

تأثیر مواد نانو بر خواص مهندسی ملات خودتراکم حاوی خاکستر بادی

رحمت مدن دوست*

دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی دانشگاه گیلان

ملک محمد رنجبر

استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی دانشگاه گیلان

احسان محسنی

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران - سازه، دانشکده فنی دانشگاه گیلان

چکیده

اخیراً مواد نانو ساختار با توجه به عملکرد برتر خود مورد توجه قرار گرفته‌اند. در این میان صنعت بتن نیز با توجه به نیازهای خود از نظر استحکام و دوام، از استفاده کنندگان مهم مواد نانو ساختار می‌باشد. لذا، مطالعات بتن و ملات حاوی افزودنی‌هایی در مقیاس نانو برای توسعه مصالح ساختمانی جدید حائز اهمیت می‌باشد.

هدف از این مطالعه بررسی ملات خودتراکم با استفاده از نانوذرات به عنوان جایگزین بخشی از سیمان است. در راستای کاهش مقدار سیمان و رسیدن به کارایی بهتر، ۲۵ درصد خاکستر بادی جایگزین سیمان شد. به کارگیری نانوذرات در کاهش مصرف سیمان به عنوان نمودی از کاربرد فناوری نانو در این راستا است. در این مقاله به بررسی خواص مهندسی ملات خودتراکم ساخته شده با به کارگیری ۱ تا ۵ درصد نانوذرات سیلیس، آهن و مس پرداخته شده است. خواص ملات تازه توسط آزمایش‌های جریان اسلامپ و جریان قیف V شکل و خواص مکانیکی ملات سخت شده با آزمایش‌های مقاومت فشاری و مقاومت خمشی در سنین ۳، ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه و جذب آب نمونه‌ها در سن ۲۸ روزه بررسی شدند. نتایج آزمایش‌ها نشان‌دهنده عملکرد مناسب نانو ذرات مذکور به خصوص نانوسیلیس و مس در بهبود کارایی، خواص مکانیکی و دوام ملات خودتراکم می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: ملات خودتراکم، خواص مهندسی، دوام، مصالح در مقیاس نانو

* نویسنده مسؤول: rmadandoust@guilan.ac.ir

۱- مقدمه

یکی از برجسته‌ترین پیشرفت‌ها در تکنولوژی بتن در سال‌های اخیر، بتن خودتراکم است. بتن خودتراکم بتنی است که به راحتی تحت اثر وزن خود بدون هیچ‌گونه لرزاندنی به طور کامل در تمام قالب پخش و آن را پر نماید و بتواند از میان میلگردها و مقاطع باریک عبور کند. بتن خودتراکم دارای سه ویژگی توانایی پرکنندگی، توانایی عبور کردن و مقاومت در برابر جداشدگی است.

روش‌های دستیابی به خودتراکمی محدود کردن حجم مواد درشت‌دانه، کاهش نسبت آب به مواد چسبنده و استفاده از فوق‌روان‌کننده می‌باشد [۱]. یکی از مضرات بتن خودتراکم هزینه آن است و با توجه به این موضوع که بعضی از افزودنی‌های معدنی همچون خاکستر بادی باعث افزایش کارایی، دوام و بهبود ویژگی‌های طولانی مدت می‌شود و از طرفی ارزان‌تر از سیمان پرتلند می‌باشد، بنابراین استفاده از این نوع افزودنی‌های معدنی نه تنها باعث کاهش هزینه SCC می‌شود، بلکه باعث بهبود ایفای نقش طولانی مدت آن می‌شود [۲].

از آنجائیکه اندازه‌گیری خواص رئولوژی بتن خودتراکم به خاطر نیاز به وسایل پیچیده اغلب مشکل است، لذا برای تعیین ویژگی کارایی SCC از ملات خودتراکم (SCM) استفاده می‌شود [۳ و ۴]. مطابق با نظر Domone و همکاران [۴] ملات‌ها با اهداف زیر مورد آزمایش قرار می‌گیرند:

۱. بتن خود تراکم نسبت به بتن معمولی شامل درشت‌دانه کمتری می‌باشد (۳۱ تا ۳۵ درصد حجمی) است. بنابراین خواص ملات بسیار نمایان می‌باشد.

۲. ارزیابی خواص ملات یک قسمت کامل طراحی فرآیند طرح اختلاط بسیاری از بتن‌های خود تراکم می‌باشد، بنابراین آگاهی از خواص ملات به‌خودی‌خود مهم است.

۳. ترکیب مصالح پودری همچنین برای کنترل خواص سخت شده همچون مقاومت استفاده می‌شود. دلیل چهارم اینکه آزمایش‌های ملات راحت‌تر از آزمایش‌های بتن می‌باشد.

نانو تکنولوژی، درک و به کارگیری خواص جدیدی از مواد و سیستم‌هایی در این ابعاد است که اثرات فیزیکی جدیدی از خود نشان می‌دهند. زمانی که ذرات بسیار ریز در خمیر سیمان، ملات و

یا بتن شرکت داده می‌شوند، مصالحی با خواص متفاوت تولید می‌شود.

به نظر نویسندگان مطالعات محدودی در خصوص حضور نانوذرات در بتن و ملات خودتراکم برای دستیابی به ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی انجام پذیرفته است. چندین گزارش درباره حضور نانوذرات در بتن‌های معمولی موجود است که اکثر آنها نیز بر روی نانوذرات سیلیس متمرکز شده اند و حضور دیگر نانو ذرات بسیار کم گزارش شده است.

Senff و همکاران به بررسی اثر نانو سیلیس بر رئولوژی و خواص خمیر سیمان و ملات تازه پرداختند و متوجه تغییراتی در خواص رئولوژی ملات تازه حاوی نانوذرات سیلیس شدند [۵]. Lin و همکاران گزارش کردند که ذرات نانو سیلیس مقاومت فشاری ملات سیمانی حاوی خاکستر لجن را بهبود می‌بخشد [۶]. Ltifi و همکاران گزارش کردند که با حضور نانوسیلیس خمیر سیمان ضخیم‌تر می‌گردد و روند هیدراتاسیون سیمان را تسریع می‌بخشد و مقاومت فشاری ملات با افزایش مقدار نانوسیلیس افزایش می‌یابد [۷]. همچنین Li و همکاران گزارش کردند که مقاومت فشاری و خمشی اندازه‌گیری شده نمونه‌های حاوی نانوسیلیس و نانو اکسید آهن بیشتر از نمونه‌های بدون نانو ذرات است [۸].

در این مقاله اثرات استفاده از نانوذرات سیلیس، آهن و مس به منظور بررسی خواص مکانیکی و جذب آب ملات خودتراکم ارائه می‌شود که شامل خاکستر بادی به عنوان افزودنی معدنی جهت بهبود روانی و یک نوع فوق‌روان‌کننده بر پایه پلی‌کربوکسیلات جهت رسیدن به خودتراکمی است.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مصالح مورد استفاده

در این مطالعه از سیمان پرتلند نوع دو مطابق با آئین نامه ASTM C150 [۹] استفاده شد و برای افزایش روانی و بهبود شرایط از خاکستر بادی استفاده گردید. ترکیب شیمیایی و مشخصات فیزیکی سیمان و خاکستر بادی در جدول ۱ آورده شده است. از ماسه رودخانه‌ای به عنوان سنگدانه استفاده شده است. دانه‌بندی ماسه مورد استفاده در جدول ۲ نشان داده شده است. برای رسیدن

۲-۲- نسبت های اختلاط

در این مطالعه ۱۶ طرح اختلاط ملات با نسبت های مختلف ساخته شد. مقدار خاکستر بادی ۲۵ درصد وزن سیمان در نظر گرفته شد و نسبت آب به مواد چسباننده (شامل سیمان + خاکستر بادی + نانوذرات) به طور ثابت در تمام نمونه ها ۰/۴ در نظر گرفته شد. ذرات نانو، به میزان ۱ تا ۵ درصد وزنی، جایگزین سیمان در نظر گرفته شد.

کدگذاری نمونه ها به این گونه است که عدد مربوط به آن نشانگر درصد وزنی استفاده شده نانوذرات است و حرف آخر مربوط به نوع نانو ذره استفاده شده می باشد که شامل ۳ نوع نانوسیلیس (NS)، نانو آهن (NF) و نانو مس (NC) می باشد.

برای رسیدن به جریان اسلامپ که در محدوده EFNARC باشد، مقدار فوق روان کننده از ۳/۵ تا ۴/۵ کیلوگرم بر متر مکعب متغیر بود [۳]. جزئیات طرح اختلاط ها در جدول ۴ آورده شده است. کمیت های ارائه شده بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب می باشد.

۲-۳- آماده کردن نمونه ها

مساحت رویه نانوذرات بسیار زیاد می باشد. همچنین از طرفی، ذرات نانو ممکن است توزیع یکنواختی در مخلوط نداشته باشند و این موضوع به طور مستقیم روی خواص فیزیکی و مکانیکی ملات ها اثر می گذارد. به همین دلیل روند تولید نمونه ها در این مطالعه بعد از چندین آزمایش مقدماتی به شکل زیر نتیجه داد:

۱. سیمان و ماسه برای مدت ۱ دقیقه با سرعت متوسط (۸۰rpm) مخلوط شدند.
۲. خاکستر بادی و ۳۰٪ آب اختلاط به همراه ذرات نانو اضافه شد و برای مدت ۱ دقیقه با سرعت بالا (۱۲۰rpm) مخلوط شدند.
۳. برای مدت ۱/۵ دقیقه به مخلوط اجازه استراحت داده شد.
۴. بعد از آن ۷۰٪ آب باقیمانده به همراه فوق روان کننده اضافه شد و برای مدت ۲ دقیقه مخلوط شدند.

ملات ها برای رسیدن به جریان اسلامپ ۲۴ تا ۲۶ سانتی متر طراحی شدند که با تغییر در مقدار فوق روان کننده نتیجه داد [۳].

مخلوط ها در قالب های مکعبی ۵×۵×۵ سانتی متری و قالب های منشوری ۲۰×۵×۵ سانتی متری ریخته شدند و بعد از یک روز که

به خود تراکمی از یک فوق روان کننده بر پایه پلی کربوکسیلات اتر با نام تجاری Vand super plast PCE مطابق با آیین نامه C494 TYPE F ASTM با غلظت ۱/۰۳g/cm³ استفاده شد.

سه نوع متفاوت نانو ذرات شامل نانوسیلیس، نانو آهن و نانومس به صورت محلول در آب که مقدار ماده جامد آن ۳۰ درصد می باشد به مخلوط ها اضافه شد. سایر مشخصات نانوذرات در جدول ۳ ارائه شده است. این ذرات به همراه فوق روان کننده پلی کربوکسیلات اتر PCE مصرف گردید.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی و مشخصات فیزیکی سیمان و خاکستر

بادی

تجزیه شیمیایی (%)	سیمان	خاکستر بادی
SiO ₂	۲۱/۵۶	۵۵/۸
Al ₂ O ₃	۶/۶۷	۲۰/۷۵
Fe ₂ O ₃	۶/۱۷	۶/۶۶
CaO	۴۹/۸۸	۴/۱۲
MgO	۴/۵۱	۱/۹
SO ₃	۲/۷۵	۰/۴۴
K ₂ O	۰/۷۶	۱/۷۳
Na ₂ O	۰/۴۳	۰/۷۸
LOI	۲/۷۹	۱/۹۵
وزن مخصوص (g/cm ³)	۳/۱۵	۲/۲
سطح مخصوص (g/cm ²)	۳۲۵۰	۲۸۵

جدول ۲- دانه بندی ماسه مورد استفاده

الزامات ASTM C136-01 (%)	درصد عبوری	اندازه الک
۸۷-۱۰۰	۹۶	mm ۴/۷۵
۷۴-۹۸	۸۲/۴	mm ۲/۳۶
۵۸-۸۰	۶۸/۲	mm ۱/۱۸
۳۸-۶۰	۴۲/۵	μm ۶۰۰
۱۵-۳۴	۲۰/۷	μm ۳۰۰
۲-۱۲	۶/۹	μm ۱۵۰

جدول ۳- مشخصات نانو ذرات مصرفی

نوع نانو	قطر نانو ذرات (نانومتر)	ویسکوزیته (CPS)	PH
نانو سیلیس	۱۵	۸	۱۰
نانو آهن	۶۰	۳	۱۰
نانومس	۱۵	۸	۱۰

جدول ۴- جزئیات طرح اختلاطها

فوق‌روان‌کننده	ماسه	آب	نانومس	نانو آهن	نانوسیلیس	خاکستر بادی	سیمان	مخلوط
۴/۲	۱۲۱۰	۲۸۰	۰	۰	۰	۱۷۵	۵۲۵	Control
۳/۷	۱۱۹۸	۲۸۰	۰	۰	۷	۱۷۵	۵۱۸	1NS
۴	۱۱۸۷	۲۸۰	۰	۰	۱۴	۱۷۵	۵۱۱	2NS
۴	۱۱۷۶	۲۸۰	۰	۰	۲۱	۱۷۵	۵۰۴	3NS
۴/۱	۱۱۶۴	۲۸۰	۰	۰	۲۸	۱۷۵	۴۹۷	4NS
۴/۲	۱۱۵۳	۲۸۰	۰	۰	۳۵	۱۷۵	۴۹۰	5NS
۳/۵	۱۱۹۸	۲۸۰	۰	۷	۰	۱۷۵	۵۱۸	1NF
۳/۵	۱۱۸۷	۲۸۰	۰	۱۴	۰	۱۷۵	۵۱۱	2NF
۴	۱۱۷۶	۲۸۰	۰	۲۱	۰	۱۷۵	۵۰۴	3NF
۴	۱۱۶۴	۲۸۰	۰	۲۸	۰	۱۷۵	۴۹۷	4NF
۴	۱۱۵۳	۲۸۰	۰	۳۵	۰	۱۷۵	۴۹۰	5NF
۳/۷	۱۱۹۸	۲۸۰	۷	۰	۰	۱۷۵	۵۱۸	1NC
۳/۹	۱۱۸۷	۲۸۰	۱۴	۰	۰	۱۷۵	۵۱۱	2NC
۴	۱۱۷۶	۲۸۰	۲۱	۰	۰	۱۷۵	۵۰۴	3NC
۴/۵	۱۱۶۴	۲۸۰	۲۸	۰	۰	۱۷۵	۴۹۷	4NC
۴/۵	۱۱۵۳	۲۸۰	۳۵	۰	۰	۱۷۵	۴۹۰	5NC

نمونه‌ها درون قالب شکل گرفتند برای عمل‌آوری داخل آب با دمای 20 ± 1 درجه سانتی‌گراد تا روز آزمایش نگهداری شدند. خواص ملات تازه توسط آزمایش‌های جریان اسلامپ و جریان قیف V شکل و خواص مکانیکی ملات سخت‌شده با آزمایش‌های مقاومت فشاری و مقاومت خمشی در سنین ۳، ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه و جذب آب نمونه‌ها در سن ۲۸ روزه بررسی شدند.

همچنین باید در نظر داشت مقدار فوق‌روان‌کننده با رعایت حد مجاز به حدی اضافه شده است که نمونه‌ها دچار آب‌انداختگی یا جداشدگی نشوند.

همانطور که مشخص است استفاده از نانوذرات قطر جریان اسلامپ را افزایش داده است. بنابراین مشخص می‌شود استفاده از نانوذرات سیلیس، آهن و مس دارای نفوذ زیادی روی خواص ملات تازه خود تراکم داشته است.

الگوی مشاهده شده در راستای افزایش کارایی در جریان اسلامپ، در آزمایش زمان جریان قیف V شکل نیز دیده شد. درواقع ملات سیمانی پایه (شاهد) دارای زمان جریان ۱۱ ثانیه می‌باشد که با اضافه شدن نانوذرات سیلیس زمان جریان تا ۸/۳ ثانیه، با اضافه شدن نانوذرات آهن تا ۷/۶ ثانیه و با اضافه شدن نانوذرات مس تا ۷/۷ ثانیه هم کاهش داشته است.

۳-۲- مقاومت فشاری

مقادیر مقاومت فشاری ملات‌های خودتراکم در جدول ۶ آورده

۳- نتایج و تحلیل آزمایش‌ها

۳-۱- خواص ملات خود تراکم تازه

نتایج آزمایش‌های جریان اسلامپ و قیف V شکل برای ملات‌های خودتراکم مختلف در جدول ۵ آورده شده است. تمامی نمونه‌های سیمانی برای رسیدن به قطر جریان اسلامپ 25 ± 1 cm که با تنظیم کردن مقدار فوق‌روان‌کننده حاصل شده بود طراحی شدند. بنابراین تمام مخلوط‌های تازه، قطر جریان اسلامپ توصیه شده توسط EFNARC را دارا هستند [۳].

نانوذرات آهن) در سنین اولیه (۳ و ۷ روز) مقاومت کمتری در مقایسه با نمونه کنترل دارند، اما در سنین بالاتر (۲۸ و ۹۰ روز) مقاومت فشاری آنها نسبت به نمونه کنترل افزایش یافته است که می تواند به علت واکنش پذیری نانوذرات آهن در طولانی مدت باشد. افزایش مقاومت فشاری در اختلاط حاوی ۲٪ وزنی نانوذرات آهن بیشترین مقدار را داراست و به علت اینکه قطر این ذرات نسبت به دو نوع نانو دیگر بیشتر است، ملاحظه می شود که در درصد های بالاتر استفاده از این نوع نانوذرات، مقاومت را کاهش می دهد.

همچنین از نتایج مشاهده می شود که مقاومت فشاری نمونه ها با اختلاط های 1NC، 2NC، 3NC، 4NC و 5NC (ملات های خودتراکم حاوی نانوذرات مس) در همه سنین بالاتر از مقاومت فشاری ملات خودتراکم کنترل با نسبت w/b یکسان می باشد. نمونه هایی که حاوی ۳٪ وزنی نانوذرات مس می باشد مقاومت فشاری بیشتری در مقایسه با دیگر نمونه ها دارند.

اگر ذرات نانو به خوبی پخش نشوند جمع شدن نانو ذرات باعث ایجاد یک ناحیه ضعیف به شکل حفره می شود و به تبع آن میکروساختار هیدرات سیمان نمی تواند شکل بگیرد و در نتیجه انتظار می رود مقاومت پایین تری بدست آید.

دلایل اصلی افزایش مقاومت فشاری ملات های خودتراکم این است که زمانی که ذرات نانو به طور یکنواختی در خمیر سیمان پخش می شوند، به عنوان هسته ای برای گره خوردن و ارتباط برقرار کردن با هیدرات سیمان عمل می کنند و همچنین به علت انرژی سطحی بالا باعث تسریع هیدراتاسیون سیمان می شوند که این قضیه برای افزایش مقاومت مطلوب می باشد. دلیل دیگر این که توزیع ذرات بی شمار نانو می تواند با تولیدات هیدراته در اطراف نواحی انتقال بین نانو ذرات و تولیدات هیدراته به شکل محکمی مقید شود. به عبارت دیگر، ذرات نانو مانع از رشد کریستال هایی مانند $Ca(OH)_2$ در میان تولیدات هیدراته می شوند. دلیل سوم اینکه ذرات نانو حفرات سیمانی را پر می کنند که موجب افزایش مقاومت می شوند. هرچند، به علت اینکه قطر ذرات نانو آهن نسبت به سایر نانو ذرات ها بسیار زیاد بودند، این ذرات نتوانستند به خوبی پخش شوند و بدین ترتیب نواحی ضعیف شکل گرفته است.

شده است. تغییرات مقاومت فشاری نیز در طول زمان در شکل های ۱ تا ۳ نشان داده شده است. در مقایسه با نمونه کنترل، در تمامی نمونه ها افزایش در مقاومت فشاری ملاحظه می گردد. از جدول ۶ ملاحظه می شود که مقاومت فشاری نمونه ها با اختلاط های 1NS، 2NS، 3NS، 4NS و 5NS (ملات های خودتراکم حاوی نانوذرات سیلیس) در همه سنین بالاتر از مقاومت فشاری ملات خودتراکم کنترل با نسبت w/b یکسان می باشد. همانطور که مشاهده می شود نمونه هایی که حاوی ۴٪ وزنی نانوذرات سیلیس می باشد مقاومت فشاری بیشتری در مقایسه با دیگر نمونه ها دارند.

جدول ۵- نتایج آزمایش های جریان اسلامپ و قیف V شکل

مخلوط	قطر جریان اسلامپ (cm)	زمان جریان قیف V شکل (s)
Control	۲۴/۵	۱۱
1NS	۲۴/۵	۱۰/۲
2NS	۲۴/۶	۹/۹
3NS	۲۴/۸	۹/۷
4NS	۲۵	۹/۱
5NS	۲۵	۸/۳
1NF	۲۴/۷	۱۰/۸
2NF	۲۴/۷	۱۰/۳
3NF	۲۴/۹	۹/۸
4NF	۲۵	۸/۵
5NF	۲۵/۵	۷/۶
1NC	۲۴/۵	۹/۸
2NC	۲۴/۸	۹/۲
3NC	۲۴/۸	۸/۲
4NC	۲۵	۸/۲
5NC	۲۵/۵	۷/۷
معیار پذیرفته شده ملات خودتراکم توسط EFNARC		
	۲۴-۲۶	۷-۱۱

نتایج نشان می دهد که مقاومت فشاری نمونه ها با اختلاط های 1NF، 2NF، 3NF، 4NF و 5NF (ملات های خودتراکم حاوی

۳-۳- مقاومت خمشی

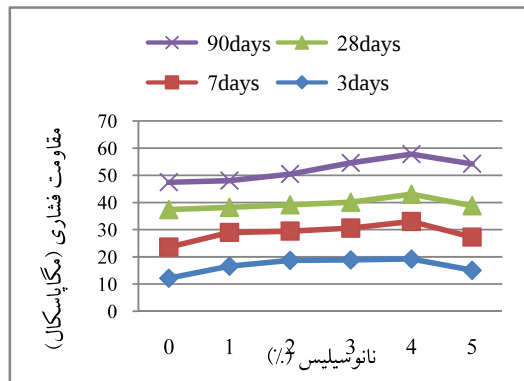
مقاومت خمشی ملات‌های خودتراکم در جدول ۷ ارائه شده است و تغییرات مقاومت خمشی در سنین مختلف در شکل‌های ۴ تا ۶ نشان داده شده است. در مقایسه با نمونه کنترل در تمامی نمونه‌ها می‌توان افزایش در مقاومت را مشاهده نمود. همچنین نتایج نشان می‌دهد که با افزایش درصد نانوذرات مختلف تا میزان ۳٪، مقاومت خمشی افزایش می‌یابد و پس از آن مقاومت رو به کاهش می‌رود. به علاوه می‌توان پیش‌بینی نمود که اثر نانوذرات در بتن خودتراکم نیز باعث افزایش مقاومت آن گردد، زیرا نه تنها خمیر سیمان را بهبود می‌بخشد بلکه سطح مشترک بین خمیر و سنگدانه‌ها را بهبود می‌بخشد.

۳-۴- جذب آب

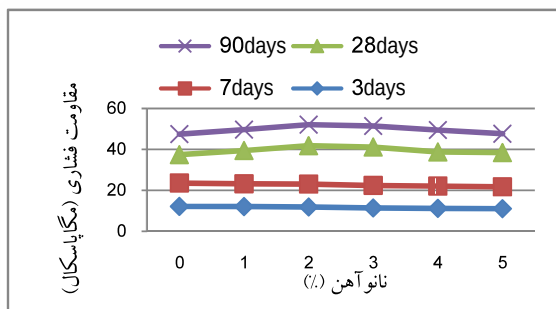
نمونه‌های مکعبی $5 \times 5 \times 5$ سانتی متر پس از ۲۸ روز عمل‌آوری از آب خارج و براساس ASTM C642 [۱۰] برای آزمایش جذب آب آماده شدند.

جدول ۶- مقاومت فشاری ملات‌های خود تراکم

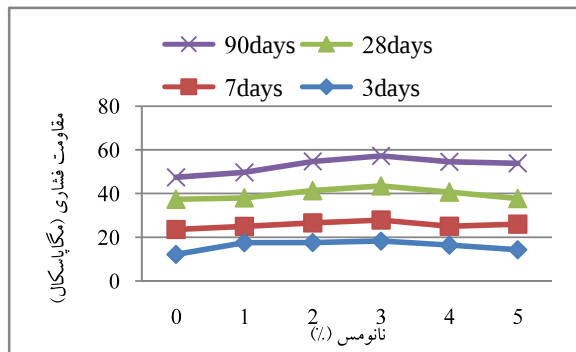
مخلوط	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)			
	روزه ۹۰	روزه ۲۸	روزه ۷	روزه ۳
Control	۴۷/۴۳	۳۷/۴	۲۳/۵۷	۱۲/۱۳
1NS	۴۸/۰۷	۳۸/۲۳	۲۸/۹۷	۱۶/۵۷
2NS	۵۰/۴۳	۳۹/۱۳	۲۹/۴۳	۱۸/۷
3NS	۵۴/۵۷	۴۰/۱	۳۰/۵۷	۱۸/۸۷
4NS	۵۷/۷۷	۴۳/۰۳	۳۳	۱۹/۲
5NS	۵۴/۲	۳۸/۸۳	۲۷/۲۷	۱۵/۰۳
1NF	۴۹/۴۷	۳۹/۴۳	۲۳/۲	۱۲/۰۳
2NF	۵۲/۱	۴۱/۷۷	۲۳/۰۳	۱۱/۸۳
3NF	۵۱/۴۷	۴۱/۱۳	۲۲/۴	۱۱/۳۷
4NF	۴۹/۴۷	۳۸/۷	۲۲/۰۷	۱۱/۱۷
5NF	۴۷/۶۳	۳۸/۴۳	۲۱/۷۳	۱۱
1NC	۴۹/۷	۳۸/۰۳	۲۴/۹۷	۱۷/۵۳
2NC	۵۴/۷	۴۱/۳۷	۲۶/۵۷	۱۷/۶
3NC	۵۷/۲۳	۴۳/۵۳	۲۷/۹	۱۸/۲۷
4NC	۵۴/۵۳	۴۰/۷	۲۵/۰۳	۱۶/۴
5NC	۵۳/۸۷	۳۷/۷۳	۲۶	۱۴/۳



شکل ۱- مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی نانوسیلیس



شکل ۲- مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی نانو آهن



شکل ۳- مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی نانومس

نتایج جذب آب ملات‌های خودتراکم در شکل ۷ نشان داده شده است. همانطور که در شکل پیداست، اضافه شدن نانوذرات سیلیس تا ۴ درصد به ملات خودتراکم باعث کاهش جذب آب نسبت به نمونه کنترل شد ولی اضافه شدن ۵ درصد نانوسیلیس به ملات باعث افزایش ناچیز جذب آب شده است. اضافه شدن نانوذرات آهن نیز باعث کاهش مقدار جذب آب ملات خودتراکم نسبت به نمونه کنترل شد و فقط افزودن ۴

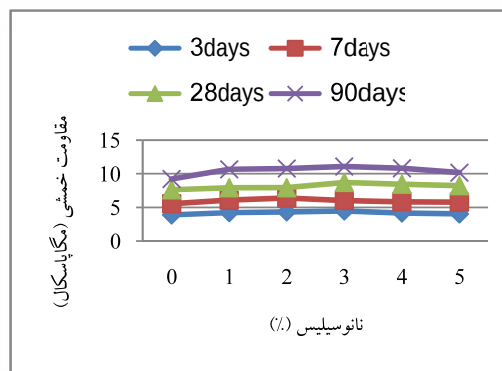
جدول ۷- مقاومت خمشی ملات‌های خود تراکم

مخلوط	مقاومت خمشی (مگاپاسکال)			
	۳روزه	۷روزه	۲۸روزه	۹۰روزه
Control	۳/۸۸	۵/۵۵	۷/۶۱	۹/۲۱
1NS	۴/۲۲	۶/۰۷	۷/۹	۱۰/۶۶
2NS	۴/۳۳	۶/۳۸	۷/۹۲	۱۰/۷۷
3NS	۴/۴۷	۶/۰۱	۸/۶	۱۱/۰۸
4NS	۴/۱۶	۵/۸۴	۸/۴۴	۱۰/۸
5NS	۴/۰۳	۵/۷۸	۸/۲۱	۱۰/۱۷
1NF	۳/۹۱	۶/۳۵	۷/۹۲	۱۰/۳۹
2NF	۴/۰۵	۶/۴۷	۸/۱۴	۱۰/۵۱
3NF	۴/۰۸	۶/۷۱	۸/۵۱	۱۰/۸۵
4NF	۴/۰۵	۶/۵	۸/۲۹	۱۰/۶۳
5NF	۳/۸۸	۶/۲۷	۸/۲	۱۰/۳۱
1NC	۴/۵	۶/۳۵	۷/۶۹	۹/۹۹
2NC	۴/۵۹	۶/۴۴	۷/۸۴	۱۰/۱۱
3NC	۴/۸۷	۶/۶۲	۸/۲۴	۱۰/۶۲
4NC	۴/۷	۶/۵	۸/۱۴	۱۰/۰۲
5NC	۴/۳۴	۵/۸۲	۷/۹۸	۹/۹۲

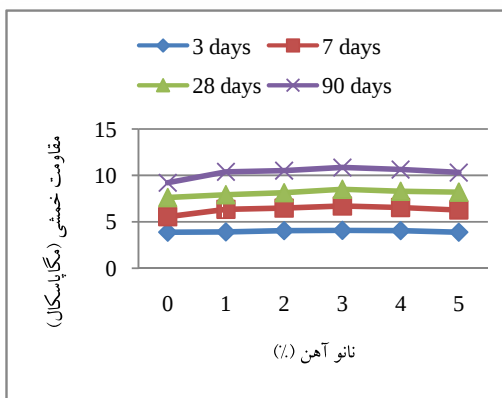
با نگاهی اجمالی به مقادیر جذب آب بدست آمده می‌توان دریافت که استفاده از نانوذرات سیلیس، آهن و مس در ملات خودتراکم باعث کاهش میزان جذب آب شده است. در بین نانوذرات مذکور، مخلوط 3NC که حاوی ۳ درصد نانو مس می‌باشد بیشترین اثر را برخواص جذب آب ملات‌ها داشته و موجب کاهش میزان جذب آب از ۸/۶۷ به ۷/۹ شده است. کاهش مقدار جذب آب در ملات‌های خودتراکم با افزودن نانوذرات سیلیس، آهن و مس می‌تواند به علت کاهش مقدار حفرات موجود در نمونه‌ها باشد. به عبارت دیگر، درصد جذب آب، مربوط به تخلخل نمونه در حال اشباع می‌باشد که با آب در ارتباط می‌باشد.

ذرات بسیار ریز نانوذرات با احاطه ذرات درشت‌تر سیمان همچون کانون‌های واکنش جهت رسوب محصولات هیدراتاسیون عمل کرده و از این طریق زمینه شکل‌گیری بافتی همگن و یکنواخت از محصولات هیدراته را فراهم می‌کنند. لذا

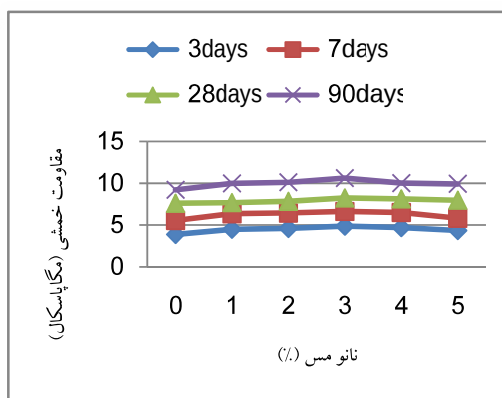
درصد نانو آهن به ملات به مقدار غیر قابل توجهی جذب آب نمونه را افزایش داد که می‌تواند به علت توزیع غیر یکنواخت نانو ذرات در این نمونه باشد که حفرات موجود را پوشش دهد. در اختلاط‌هایی که ذرات نانومس به آن افزوده شد مقدار جذب آب در تمامی آنها کاهش یافت.



شکل ۴- مقاومت خمشی نمونه‌های حاوی نانو سیلیس



شکل ۵- مقاومت خمشی نمونه‌های حاوی نانو آهن



شکل ۶- مقاومت خمشی نمونه‌های حاوی نانومس

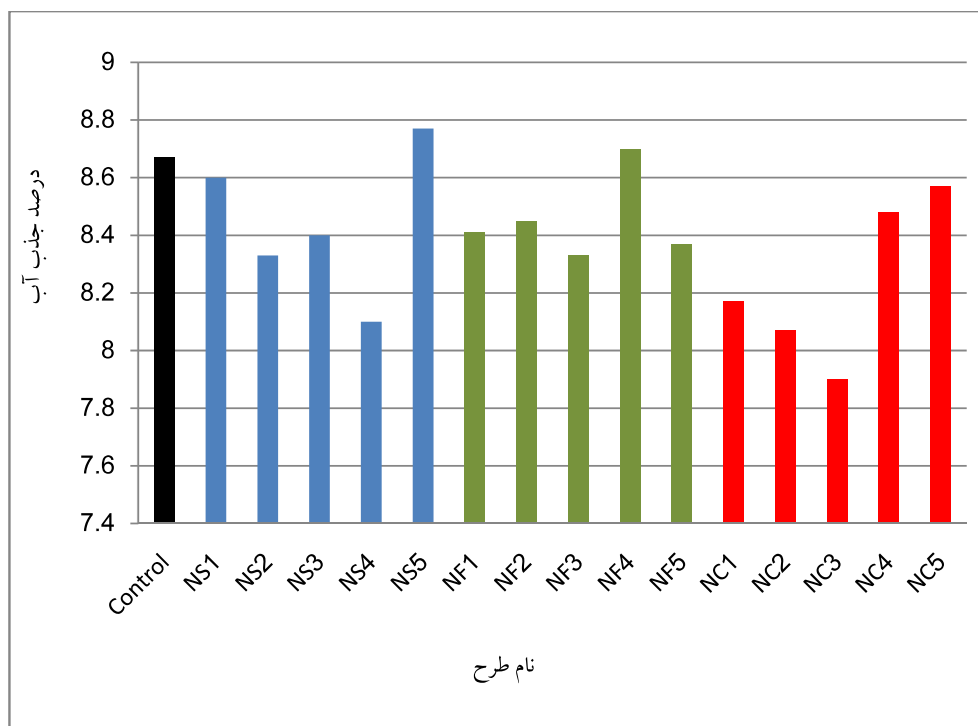
به آسانی می‌توان نتیجه گرفت حضور این ذرات بسیار ریز با پرکردن حفرات موئین هم وجود در بافت خمیر سیمان و مسدود کردن راه‌های ارتباطی شبکه موئینه از یک سو، و ایجاد میکروساختار یکنواخت و توزیع بهتر محصولات هیدراتاسیون و در نتیجه کاهش حفرات نفوذپذیر از سوی دیگر، موجبات کاهش جذب آب ملات را فراهم می‌کنند.

۳-۵- میکروساختار ملات خود تراکم

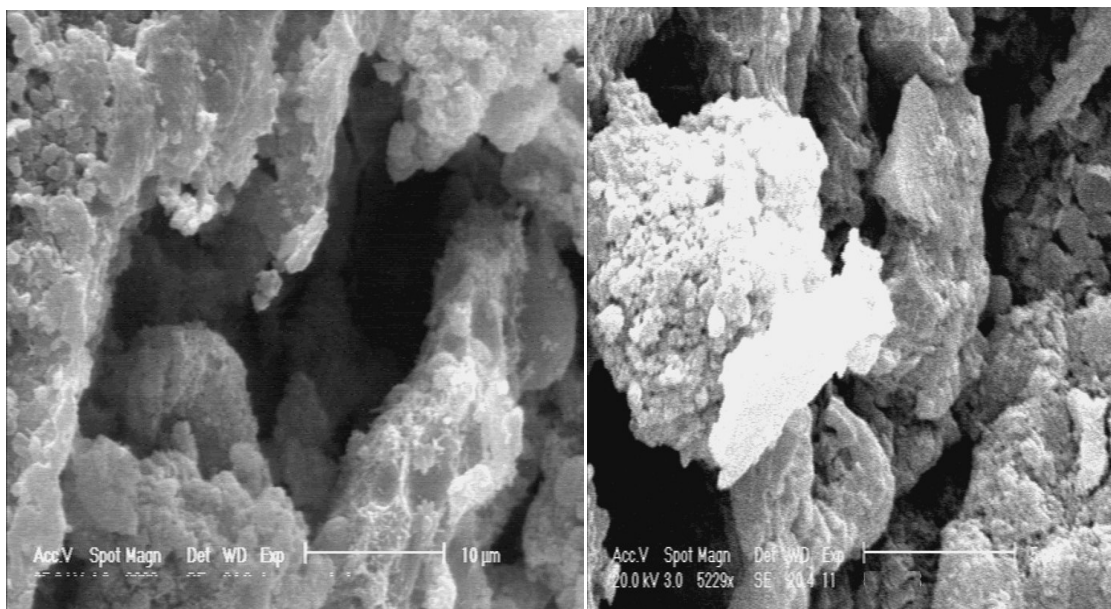
بررسی‌ها حاکی از آن است که خصوصیات فیزیکی مصالح سیمانی از جمله مقاومت و نفوذپذیری تا حد بسیار زیادی به میکروساختار خمیر سیمان سخت‌شده وابسته است. از این رو، بررسی میکروساختار سیمان می‌تواند راهی در جهت پیش‌بینی خواص محصولات سیمانی باشد. به همین دلیل، اثر افزودن نانوذرات سیلیس، آهن و مس بر میکرو ساختار ملات خودتراکم ساخته شده با مخلوط‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۸ نشان‌دهنده میکروساختار ملات خودتراکم کنترل می‌باشد. با توجه به تصاویر، مشاهده می‌شود که نمونه‌های فاقد نانوذرات دارای سطح یک مو بیش ناهموار می‌باشد که توسط کریستال‌های بزرگی احاطه شده است. در بخش‌هایی از تصویر مربوطه، رشد موضعی کریستال‌های هیدراته مشاهده می‌شود که بر عدم یکنواختی آن می‌افزاید. همچنین وجود خلل و فرج‌هایی که در حدود ۱۰ میکرومتر عرض دارند در تصویر مشخص است. در شکل ۹ می‌توان میکروساختار ملات‌های خودتراکم حاوی ۱ درصد، ۳ درصد و ۴ درصد نانوسیلیس را به ترتیب مشاهده کرد. در تصویری که مربوط به حضور ۱ درصد نانوسیلیس می‌باشد مشخص است که با وجود ذرات نانو همچنان نمونه دارای عدم یکنواختی و خلل و فرج‌هایی می‌باشد. تصویری که از ملات خودتراکم ساخته شده با ۳ درصد نانوسیلیس تهیه شده، موید افزایش تراکم و افزایش یکنواختی ملات سخت شده با حضور نانوذرات سیلیس می‌باشد. اما همان‌گونه که مشاهده می‌گردد، در نمونه حاوی ۴ درصد نانوسیلیس نسبت به حضور ۳ درصدی نانوسیلیس شاهد افزایش تخلخل هستیم. روندی مشابه توسط دیگر محققان نیز برای بتن خودتراکم حاوی روباره و درصد‌های مختلف نانوسیلیس گزارش شده است [۱۱].

در شکل ۱۰ می‌توان میکروساختار ملات‌های خودتراکم حاوی ۱ درصد، ۲ درصد و ۳ درصد نانوآهن را به ترتیب مشاهده کرد. در تصویری که مربوط به حضور ۱ درصد نانوآهن می‌باشد مشخص است که نمونه سطحی ناهموار دارد. تصویری که از ملات خودتراکم ساخته شده با ۲ درصد نانوآهن تهیه شده، موید افزایش تراکم و افزایش یکنواختی ملات سخت شده با حضور نانوآهن می‌باشد و در تصویر مربوط به نمونه حاوی ۳ درصد نانوآهن همچنان سطحی هموار به همراه خلل و فرج‌های بسیار ریز به عرض حدود ۱ میکرومتر می‌باشد. به نظر می‌رسد عدم ریزی کافی ذرات نانوآهن موجب شکل‌گیری چنین ساختاری شده است و با وجود مقدار بیشتر نانوذرات (۳ درصد) همچنان خلل و فرج‌هایی در حدود ۱ میکرومتر در سطح نمونه به وجود آمده است.

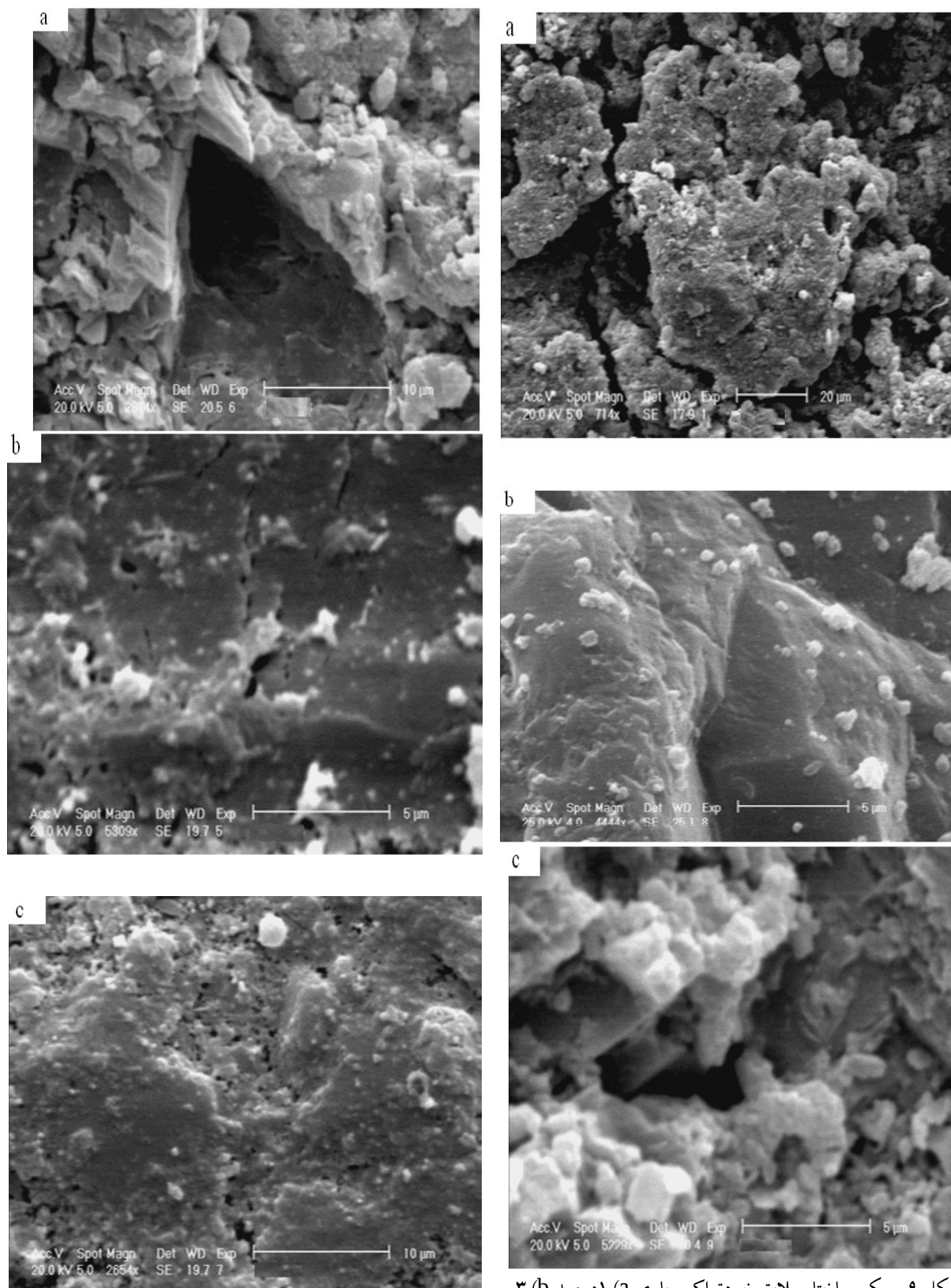
در شکل ۱۱ می‌توان میکروساختار ملات‌های خودتراکم حاوی ۱ درصد، ۳ درصد و ۴ درصد نانومس را به ترتیب مشاهده کرد. در شکل ۱۱(a) که مربوط به حضور ۱ درصد نانومس است، مشخص است که ذرات نانو مس نتوانسته‌اند خلل و فرج‌های موجود در نمونه را به خوبی پوشش دهند و حفره‌های موجود در سطح نمونه این قضیه را نشان می‌دهد. شکل ۱۱(b و c) که از ملات خودتراکم ساخته شده با ۳ درصد و ۴ درصد نانومس تهیه شده، موید افزایش تراکم و افزایش یکنواختی ملات سخت شده با حضور نانومس می‌باشد. به نظر می‌رسد اثر پرکنندگی نانو ذرات عامل اصلی افزایش تراکم بافت ملات خودتراکم سخت‌شده باشد. در عین حال نانوذرات به دلیل فراهم کردن تعداد بسیار زیادی کانون‌های واکنش جهت رسوب محصولات هیدراتاسیون، زمینه شکل‌گیری میکروساختاری یکنواخت و همگن را فراهم ساخته است. نکته قابل توجه همخوانی بسیار خوب نتایج حاصل از آزمایش‌های مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و جذب آب با تصاویر گرفته شده توسط میکروسکوپ الکترونی است. چرا که در اکثر موارد بهبود میکروساختار ملات خودتراکم متناظر با بهبود خصوصیات مکانیکی و فیزیکی ملات‌های ساخته شده با آن می‌باشد.



شکل ۷- نتایج جذب آب ملات‌های خودتراکم



شکل ۸- میکروساختار ملات خودتراکم نمونه کنترل



شکل ۱۰- میکروساختار ملات خودتراکم حاوی (a) ۱ درصد (b) ۲ درصد و (c) ۳ درصد نانواهن

شکل ۹- میکروساختار ملات خودتراکم حاوی (a) ۱ درصد (b) ۳ درصد و (c) ۴ درصد نانوسیلیس

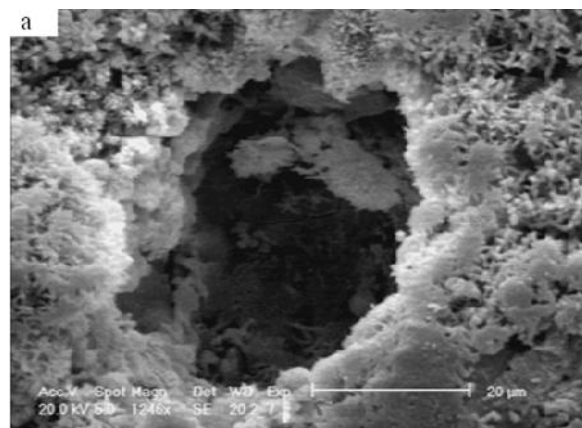
شده است. در واقع ملات سیمانی پایه (شاهد) دارای زمان جریان ۱۱ ثانیه می باشد که با اضافه شدن نانوذرات سیلیس زمان جریان تا ۸/۳ ثانیه، با اضافه شدن نانوذرات آهن تا ۷/۶ ثانیه و با اضافه شدن نانوذرات مس تا ۷/۷ ثانیه هم کاهش داشته است. لذا انتظار می رود استفاده از نانوذرات سیلیس، آهن و مس دارای نفوذ زیادی روی خواص ملات تازه خودتراکم داشته باشد.

۲. افزودن نانوسیلیس به ملات خودتراکم، موجب بهبود قابل ملاحظه ای در مقاومت های فشاری و خمشی ملات های خودتراکم گردید. جایگزین کردن نانوسیلیس تا ۴ درصد وزنی بر میزان بهبود مقاومت فشاری افزود و در درصد های بالاتر مقاومت فشاری رو به کاهش گذاشت. همچنین با افزایش نانوسیلیس تا ۳ درصد وزنی بر میزان بهبود مقاومت خمشی افزوده شد و پس از آن مقاومت رو به کاهش گذاشت. اگرچه با وجود کاهش در مقاومت های فشاری و خمشی، همچنان مقاومت نمونه بالاتر از نمونه شاهد می باشد.

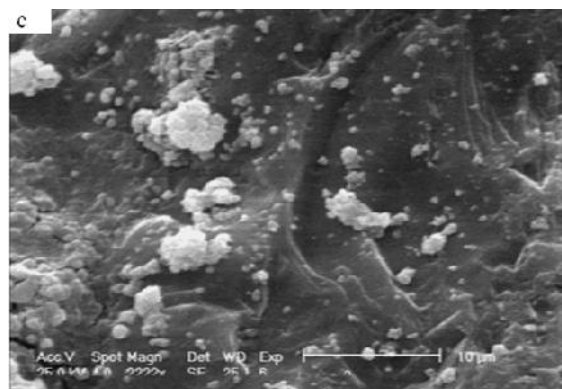
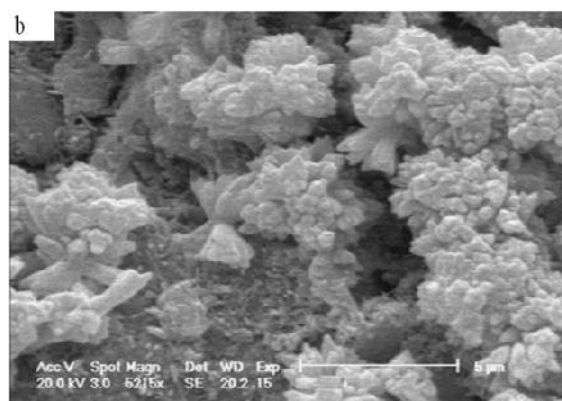
۳. همراه کردن نانو آهن با ملات خودتراکم، موجب بهبود در مقاومت های فشاری و خمشی ملات های خودتراکم گردید. در سنین اولیه (۳ و ۷ روز) مقاومت فشاری کمتری در مقایسه با نمونه کنترل بدست آمد اما در سنین بالاتر (۲۸ و ۹۰ روز) مقاومت فشاری آنها نسبت به نمونه کنترل افزایش یافته است که این افزایش در اختلاط شامل ۲ درصد نانو آهن بیشترین مقدار را داراست. همچنین با افزایش درصد جایگزینی نانو آهن تا ۳ درصد وزنی بر میزان بهبود مقاومت خمشی افزوده شد و بعد از آن مقاومت رو به کاهش گذاشت. اگرچه با وجود کاهش در مقاومت خمشی، همچنان مقاومت نمونه بالاتر از نمونه کنترل بود. البته روند افزایش مقاومت در مقایسه با نمونه های حاوی نانوسیلیس و نانومس بسیار کندتر بوده است.

۴. بررسی ها نشان داد که افزودن نانوذرات مس به ملات خودتراکم نیز باعث بهبود در مقاومت های فشاری و خمشی شده است.

۵. در میان نمونه های حاوی نانوذرات مختلف، نمونه های خودتراکم حاوی ۴ درصد نانوسیلیس بیشترین روند کسب مقاومت فشاری در سنین مختلف را نسبت به دیگر نمونه های حاوی نانوذرات آهن و مس نشان داده است.



شکل ۱۱ (a) - میکروساختار ملات خودتراکم حاوی ۱ درصد نانومس



شکل ۱۱ (b و c) - میکروساختار ملات خودتراکم حاوی ۳ درصد و ۴ درصد نانومس

۴- نتیجه گیری

۱. استفاده از نانو ذرات به روشنی قطر جریان اسلامپ را افزایش می دهد. الگوی مشابه در آزمایش زمان جریان قیف V نیز دیده

6. Lin K.L, Chang W.C, Lin D.F, Luo H, Tsai M.C, "Effects of nano-SiO₂ and different ash particle sizes on sludge ash-cement mortar", Journal of Environmental Management 88 pp. 708-714 (2008).
7. Ltifi M , Guefrech A, Mounanga P, Khelidj A, "Experimental study of the effect of addition of nano-silica on the behavior of cement mortars", Proceeding Engineering 10 pp. 900-905 (2011).
8. Li H, Xiao H, Yuan J, Ou J, "Microstructure of cement mortar with nano-particles", Composites: Part B 35 pp. 185-189 (2004).
9. ASTM C150 "Standard Specification for Portland Cement", Annual book of ASTM standards, 4.01, 186-189, (2000).
10. ASTM 642 "Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete", Annual book of ASTM standards, 4.01, pp. 186-189, (2000).
11. Ali Nazari, Shadi Riahi, "The role of SiO₂ nanoparticles and ground granulated blast furnace slag admixtures on physical, thermal and mechanical properties of self compacting concrete", Materials Science and Engineering A 528 pp. 2149-2157(2011).

۶. استفاده از نانوسیلیس باعث کاهش جذب آب ملات‌ها گردید که حکایت از پتانسیل بالای این ماده افزودنی در کاهش نفوذپذیری کامپوزیت‌های سیمانی دارد. میزان جذب آب ملات حاوی ۴ درصد نانو سیلیس کمتر از نمونه‌های حاوی نانوسیلیس با درصدهای دیگر بوده است.
۷. اضافه شدن نانوذرات آهن و مس نیز باعث کاهش مقدار جذب آب ملات‌های خودتراکم نسبت به نمونه کنترل شد و فقط افزودن ۴ درصد نانو آهن به ملات خودتراکم به مقدار غیرقابل توجه‌ای جذب آب نمونه را نسبت به نمونه کنترل افزایش داد. در بین نانوذرات مذکور، مخلوط 3NC که حاوی ۳ درصد نانومس می‌باشد بیشترین اثر را بر خواص جذب آب ملات‌ها داشته و موجب کاهش میزان جذب آب از ۸/۶۷ به ۷/۹ شده است.
۸. کاهش مقدار جذب آب در ملات‌های خود تراکم با افزودن نانو ذرات سیلیس، آهن و مس می تواند به علت کاهش مقدار خفرات موجود در نمونه‌ها باشد. به عبارت دیگر درصد جذب آب، مربوط به تخلخل نمونه در حال اشباع می باشد که با آب در ارتباط می باشد.

۵- مراجع

1. Okamura H and Ouchi M "Application of self compacting concrete in Japan" Proceeding of the first International RILEM self compacting concrete. Japan, pp. 3-9 (2000).
2. "The European Guidline for self compacting concrete specification", production and use. May (2005).
3. EFNARC "Specification and guidlines for self compacting concrete", pp. 29-35, Feb (2002) <http://efnarc.org>.
4. Domone PL, Jin J "Proprties of mortar for self-compacting concrete". In: Proceeding of the first International RILEM symposium on self-compacting concrete. Stockholm, Sweden, pp. 109-120 (1999).
5. Senff L, Labrincha J.A, Ferreira V, Hotza D, L. Repette W.L, "Effect of nano-silica on rheology and fresh properties of cement pastes and mortars", Construction and Building Materials 23 pp. 2487-2491 (2009).

Effect of Nano Materials on Engineering Properties of Self Compacting Mortar Containing Fly Ash

R. Madandoust*

Associate Professor Department of Civil Engineering, University of Guilan

M. M. Ranjbar

Assistant Professor Department of Civil Engineering, University of Guilan

E. Mohseni

M.Sc student, Department of Civil Engineering, University of Guilan

(Received: 2013/9/23 - Accepted: 2013/11/20)

Abstract

Nano-structure materials recently attracted much scientific interest due to their superior performance. As well as concrete industry, according to its needs both in terms of strength and durability is one of the important users of nano structured materials. Therefore, concrete and mortar studies containing additive in nano scale is so important to development of new building materials.

The aim of this study is to assess the self compacting mortars (SCMs) by using nano particles as a replacement of cement. In addition to reduce the amount of cement and to achieve the better workability, 25% fly ash was replaced in cement in all samples. Reduction of cement usage is a symbol of sustainable development and application of nano particles is a mark of nano technology helping in the same direction to make a brighter future. In this paper, the engineering properties of SCMs made by using of 1- 5% of SiO_2 , Fe_2O_3 and CuO nano particles are investigated. The fresh properties of mortar determined using mini V-funnel and mini slump flow tests and the hardened properties that determined by compressive strength, flexural strength tests at 3, 7, 28 and 90 days and water absorption test determined at 28 days. The results of experiments show the appropriate performance of the mentioned nanoparticles especially for SiO_2 and CuO nano particles in improvement of workability, mechanical properties and durability of self compacting mortars.

Key words: Self Compacting Mortar, Engineering Properties, Durability, Nano Scale Materials

* Corresponding author: rmadandoust@guilan.ac.ir